

Применение вибрационных технологических датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере месторождения Наталка)

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹,
Н. Е. Ломакина¹, П. Е. Шаров¹

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт)»,
г. Магадан, Российская Федерация

² ВШЭ МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Рассматривается использование вибрационных технологических (ВТ) датчиков для мониторинга деформаций и смещений породного массива в условиях карьерной отработки месторождения Наталка. Авторы подтвердили высокую эффективность применения ВТ-датчиков для выявления изменений в породном массиве. В ходе исследования установлена значительная активность деформаций в опасных зонах карьера, что иллюстрирует возможность ВТ-датчиков. Продемонстрирована высокая результативность мониторинга при выявлении зон с интенсивной деформационной активностью, что обеспечивает своевременную реакцию и предотвращение аварийных ситуаций.

Ключевые слова: месторождение Наталка, вибрационно-технологические датчики, мониторинг деформаций, смещения породного массива, карьерная отработка, активность деформаций, опасные зоны карьера

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллегам и сотрудникам АО «Полус Магадан» за предоставленные материалы и консультации. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Ломакина Н.Е., Шаров П.Е. Применение вибрационных технологических датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере месторождения Наталка). *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):78-83. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-78-83>.

Application of vibration technology sensors for monitoring deformations and displacements of rock mass in open-pit mining of deposits (on the example of the Natalka deposit)

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Yu. Garifulina¹, N. E. Lomakina¹, P. E. Sharov¹

¹ North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

² Higher School of Economics of Lomonosov Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. The article discusses the use of vibration technology (VT) sensors for monitoring deformations and displacements of the rock mass in the conditions of open-pit mining at the Natalka deposit. The authors have confirmed the high efficiency of using VT sensors to detect changes in the rock mass. The study has revealed significant deformation activity in the hazardous areas of the quarry, which demonstrates the potential of VT sensors. The study has also demonstrated the effectiveness of monitoring in identifying areas with intense deformation activity, which allows for timely response and prevention of accidents.

Keywords: Natalka deposit, vibration technology sensors, deformation monitoring, rock mass displacement, open-pit mining operation, deformation activity, hazardous pit zones

Acknowledgments: The authors express their gratitude to their colleagues and employees at Polyus Magadan JSC for the materials and consultations provided. The research was funded by the authors themselves.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Lomakina N.E., Sharov P.E. Application of vibration technology sensors for monitoring deformations and displacements of rock mass in open-pipe mining of deposits (on the example of the Natalka deposit). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6): 78-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-78-83>.

Введение

Мониторинг деформаций и смещений горной массы является одной из ключевых задач маркшейдерского обеспечения безопасного и эффективного ведения открытых горных работ. Надежное и оперативное получение данных о состоянии горного массива позволяет своевременно выявлять участки с повышенной геодинамической активностью, предотвращая аварийные ситуации и оптимизируя горнотехнические мероприятия.

В современных условиях внедрение систем автоматизированного контроля, основанных на использовании вибрационных технологических (ВТ) датчиков, открывает новые возможности для непрерывного наблюдения за поведением горного массива в режиме реального времени. Применение таких датчиков позволяет значительно повысить точность и частоту снятия измерений, а также минимизировать влияние человеческого фактора.

Цель исследований: анализ опыта применения вибрационных технологических ВТ-датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений (на примере одного из крупнейших и наиболее сложных в плане геомеханики месторождений – месторождения Наталка).

Методы исследований

В работе анализируются методики установки датчиков, особенности обработки и интерпретации полученных данных, а также перспективы использования данной технологии для повышения безопасности и эффективности открытой отработки месторождений.

Для мониторинга были установлены ВТ-датчики в различных блоках отрабатываемой горной массы на месторождении Наталка. Схема расположения датчиков соответствовала проектной конфигурации по ключевым зонам возможных смещений. Данные с датчиков собирались после взрывных работ и в процессе деформирования пород. Измерялись минимальные, максимальные и средние величины смещений в миллиметрах. Система обеспечивала детектиро-

вание 98–100 % установленных датчиков, что гарантировало качество мониторинга. Анализ данных проводился путем статистической обработки информации по блокам и сравнения тенденций на протяжении времени [1–3].

Результаты исследований.

В ходе мониторинга за 2020 год было установлено и проанализировано более 300 ВТ-датчиков в различных блоках месторождения Наталка (табл. 1).

Например, в блоке 757.5-14 из 5 установленных датчиков (рис. 1) все были обнаружены (100 %), минимальное смещение составило 0,4 мм, максимальное – 1,4 мм, среднее – 1,0 мм.

Аналогично в блоке 757.5-16 из 3 датчиков среднее смещение достигало 2,96 мм. Общая статистика по большинству блоков показывала средние смещения от 1 до 3 мм с максимальными величинами до 6 мм. Процент обнаружения датчиков обычно превышал 90 %, что свидетельствовало о надежности системы мониторинга [4–6].

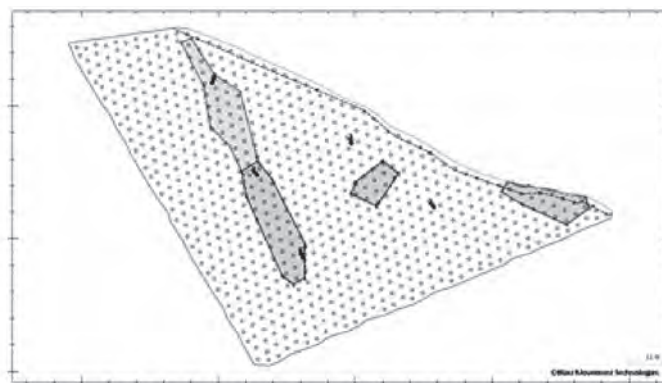


Рис. 1. Схема расположения датчиков блока 757.5-14 /
Fig. 1. Sensor layout diagram for block 757.5-14

В блоке 757.5-15 при 13 датчиках (рис. 2) минимальное смещение достигало 0,8 мм, максимальное – 3,3 мм, среднее – 1,95 мм.

Таблица 1 / Table 1

Анализ вибрационных технологических датчиков в различных блоках месторождения Наталка /
Analysis of VT sensors in various blocks of the Natalka deposit

Блок / Block	Установлено датчиков / Sensors Installed	Обнаружено датчиков / Sensors Detected	Процент обнаружения / Detection %	Мин. смещение / Min Displacement, mm	Макс. смещение / Max Displacement, mm	Среднее смещение / Mean Displacement, mm
757.5-14	5	5	100	0,4	1,4	1,0
757.5-15	13	13	100	0,8	3,3	1,95
757.5-16	3	3	100	2,2	3,7	2,96
765-34	2	2	100	1,0	1,5	1,25
780-55	13	13	100	1,1	4,5	2,6
780-56	5	5	100	1,6	4,9	3,34
757.5-17	5	5	100	0,9	3,4	2,4
757.5-18	6	6	100	1,2	2,4	2,2

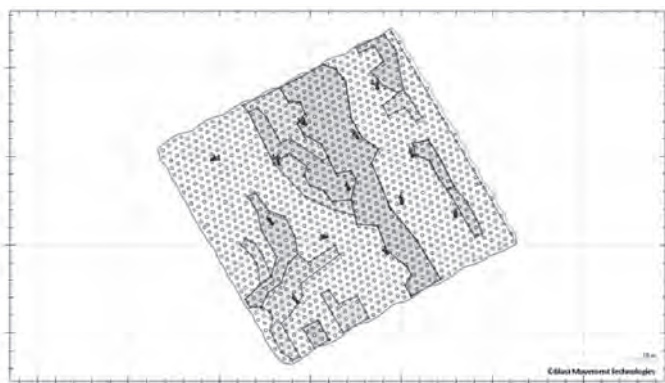


Рис. 2. Схема расположения датчиков блока 757.5-15 /
Fig. 2. Sensor layout diagram for block 757.5-15

Схемы расположения ВТ-датчиков демонстрировали равномерное покрытие ключевых зон наблюдения в блоках месторождения Наталка, обеспечивая надежный сбор данных. Установленное количество датчиков варьировалось от 2 до 13 на блок, что позволяло детально регистрировать локальные деформационные процессы [1–3].

Во всех проанализированных блоках обнаружение датчиков колебалось от 89 до 100 %, что указывало на высокую надежность системы (рис. 3).

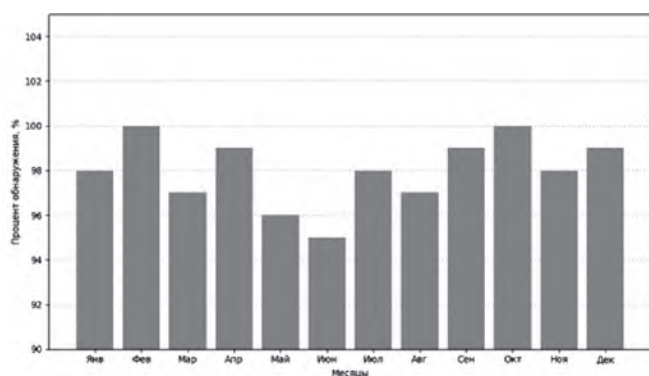


Рис. 3. Процент обнаружения вибрационных технологических датчиков по месяцам /
Fig. 3. Percentage of IMT sensor detections by month

Средние смещения варьировались от 0,5 до 3,3 мм, что позволяло констатировать контролируемый характер деформаций. График динамики средних смещений по времени для блоков 757.5-15 и 757.5-16 представлен на рисунке 4.

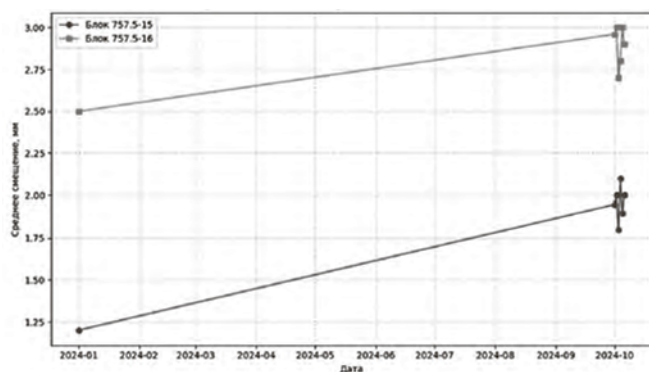


Рис. 4. Динамика средних смещений по времени для блоков 757-15 и 757-16 /
Fig. 4. Time-dependent average displacement dynamics for blocks 757-15 and 757-16

Анализ динамики средних смещений по времени для блоков 757.5-15 и 757.5-16 показал следующие ключевые особенности:

1. В обоих блоках наблюдался период начального роста средних смещений, что соответствовало активным этапам взрывных работ и перестройки горных масс. Это типично для режима, когда происходили интенсивные движения пород и формирование новых зон напряжений [7–10].

2. Максимальные значения смещений в блоке 757.5-16 значительно превышали аналогичные в блоке 757.5-15, что, возможно, связано с более высокой трещиноватостью, расположением или физико-механическими характеристиками горной массы. В литературе указано, что геологические особенности массива (трещиноватость, плотность пород) существенно влияют на величину и скорость смещений.

3. После достижения пиковых значений средние смещения в обоих блоках снижались, что свидетельствовало о стабилизации массива и перераспределении напряжений. Этот этап согласуется с фазой релаксации напряжений и снижением динамических воздействий после активной фазы подрыва. Снижение смещений в конце периода говорит о том, что горная масса адаптируется к новым условиям и технические меры контроля (например, крепление пород) работают эффективно, что подтверждается устойчивостью роста деформаций [11–13].

4. Разница в динамике между блоками указывает на неоднородность горных условий и подчеркивает необходимость индивидуального подхода к мониторингу и управлению деформациями для каждого блока.

Диапазон смещений представлен на комбинированной диаграмме (рис. 5).

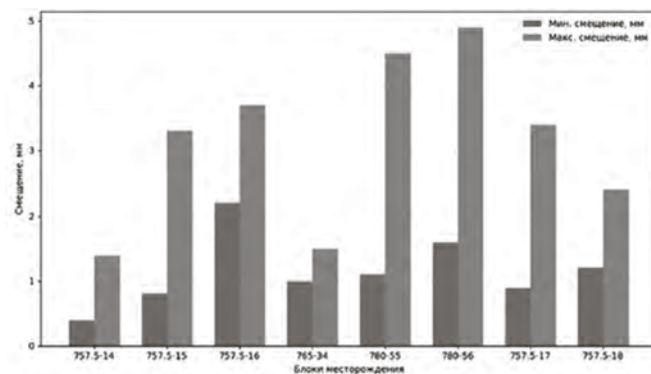


Рис. 5. Диапазон смещения в блоках месторождения Наталка /
Fig. 5. Offset range in the Natalka deposit blocks

Во всех блоках диапазон смещений достаточно выражен, что указывает на неоднородность деформационных процессов по горному массиву [10–13]. При этом максимальные смещения в некоторых блоках существенно превышают минимальные.

Например, блоки 780-56 и 780-55 имеют наиболее широкий диапазон смещений: максимальные значения достигают 4,9 и 4,5 мм соответственно, при минимальных смещениях на уровне 1,6–1,1 мм. Такое поведение может быть связано с особенностями геологического строения и локальными зонами повышенной трещиноватости или слабости горной массы в этих блоках.

В блоках 757.5-16 и 757.5-17 смещения находятся в среднем диапазоне: максимальные – около 3,4–3,7 мм, ми-

нимальные – от 0,9 до 2,2 мм. Эти данные свидетельствуют о более стабильном состоянии массива по сравнению с наиболее изменчивыми блоками, но с заметными локальными сдвигами.

Блоки с меньшим диапазоном смещений, например 765-34 и 757.5-14, характеризуются максимальными смещениями менее 1,5 мм, что говорит о большей сейсмической или механической стабильности данных участков. При этом размах смещений отражает неоднородность инженерно-геологических условий и требует комплексного подхода к мониторингу с учетом локальных особенностей каждого блока [13–15]. Большой размах указывает на необходимость усиленного контроля и, возможно, корректирующих мероприятий в особо уязвимых зонах.

Сопоставление минимальных и максимальных смещений позволяет оценить степень изменчивости и напряженности горного массива, а также адаптировать методы крепления и поддержания устойчивости в различных участках месторождения.

Обсуждение

1. В представленном исследовании выполнен анализ результатов мониторинга деформаций и смещений горной массы месторождения Наталка.

2. Анализ динамики средних смещений по времени на примере блоков 757.5-15 и 757.5-16 выявил характерные фазовые изменения. При этом наблюдался рост деформаций в периоды активных буровзрывных работ с последующим снижением смещений в конце периода, что указывает на процесс стабилизации горного массива и успешного перераспределения внутренних напряжений. Такая динамика согласуется с классическими моделями формирования и затухания деформаций в горных массах после взрывных воздействий, а также свидетельствует о корректной работе систем контроля [11–13].

3. Декомпозиция диапазонов смещений в отдельных блоках подтвердила неоднородность инженерно-геологических условий месторождения. Значительно различающиеся максимальные и минимальные смещения в блоках 780-55 и 780-56 по сравнению с более стабильными участками (например, 765-34, 757.5-14) подчеркивают необходимость индивидуального подхода к мониторингу и оценке рисков в каждом блоке. Это обусловлено вариациями структурно-тектонических характеристик и распределением трещиноватых зон, что влияет на пластичность и стабильность массива [12–15].

4. Результаты комбинированной диаграммы, отражающие размах смещений, демонстрируют, что в зонах с максимальными смещениями необходимо усилить меры контроля и, возможно, корректировать технологии горных работ. Одновременно участки с малыми диапазонами смещений могут служить ориентиром для оценки эффективности применяемых управления массивом.

Заключение

1. В статье приведены результаты исследований и анализ опыта применения вибрационных технологических ВТ-датчиков для мониторинга деформаций и смещений горной массы при открытой отработке месторождений Наталка.

2. Внедрение ВТ-датчиков на Наталке обеспечивает надежный и оперативный мониторинг деформаций, позволяет выявлять локальные особенности, а также своевременно принимать меры по снижению рисков неустойчивости.

3. Примененная методика мониторинга может быть рекомендована к масштабированию на аналогичные условия с целью повышения безопасности и эффективности горных работ.

4. Рекомендуется расширение применения ВТ-датчиков в аналогичных горных условиях с учетом специфики геологических и технологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Захаров В.Н., Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А. и др. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем. *Горный журнал*. 2021; 11: 45-52.
Zakharov V. N., Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., et al. Big Data and Sustainable Functioning of Mining Systems. *Mining Journal*. 2021; 11: 45-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.06>.
- Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А. и др. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами. *Горный журнал*. 2022; 12: 55-61.
Zakharov V. N., Kaplunov D. R., Klebanov D. A., et al. Methodological approaches to standardization of data collection, storage and analysis in the management of mining systems. *Mining Journal*. 2022; 12: 55-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>.
- Захаров В.Н., Клебанов Д.А., Макеев М.А. и др. Анализ методов подготовки и преобразования информации, поступающей в хранилища данных для эффективного управления горнотехнической системой. *Горная промышленность*. 2023; 5S: 10-17.
Zakharov V. N., Klebanov D. A., Makeev M. A., et al. Analysis of Methods for Preparing and Converting Information Entering Data Stores for Effective Management of a Mining System. *Mining Industry*. 2023; 5S: 10-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-10-17>.
- Каган М.М., Чернобров Д.С. Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром. *Горная промышленность*. 2023; S1: 84-88.
Kagan M. M., Chernobrov D. S. Monitoring of Seismic Activity in the Quarry's Near-Surface Massif Based on Seismometers in Deep Wells Beyond the Final Contour. *Mining Industry*. 2023; S1: 84-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>.
- Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А. и др. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий. *Горная промышленность*. 2023; 5S: 18-24.
Rasskazov I. Yu., Fedotova Yu. V., Anikin P. A., et al. Improvement of Methods and Means of Geomechanical Monitoring Based on Digital Technologies. *Mining Industry*. 2023; 5S: 18-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>.
- Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М. и др. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020; 1: 53-57.
Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kagan M. M., et al. Principles of Organizing an Integrated System for Monitoring the Sustainability of Mining Enterprises. *Mining Journal*. 2020; 1: 53-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>.

- О.В. Структура комплексной системы мониторинга устойчивости объектов открытых горных работ с применением цифровых технологий. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021; 4: 70-77.
- Rybin V.V., Konstantinov K.N., Nagovitsyn O.V. The structure of an integrated system for monitoring the stability of open-pit mining facilities using digital technologies. *Physical and Technical Problems of Mineral Deposits Development*. 2021; 4: 70-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210407>.
8. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Розанов И.Ю. Многоуровневый подход к организации мониторинга устойчивости бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021;5:106-113.
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Yu. Multilevel approach to the organization of monitoring the stability of quarry slopes. *Physical and technical problems of mining*. 2021;5:106-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210510>.
 9. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Рыбин В.В. и др. Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных. *Горная промышленность*. 2024; 4: 121-128.
Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Rybin V.V., et al. Control and Management of the Geomechanical State and Stability of Structural Elements of Mining Structures in Quarries Based on the Collection and Analysis of Big Data. *Mining Industry*. 2024; 4: 121-128. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>.
 10. Хакулов В.А., Шаповалов В.А., Игнатов В.Н. и др. Совершенствование методологии мониторинга геомеханического состояния и трансформации свойств массивов горных пород для обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 68-83.
Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N., et al. Improving the Methodology of Monitoring the Geomechanical State and Transformation of Rock Mass Properties to Ensure the Safety and Efficiency of Geotechnologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 9: 68-83. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_68.
 11. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020; 30 (6): 747-757. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>.
 12. He M., Xia H., Jia X., et al. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012; 4 (2): 97-114. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00097>.
 13. Jiang F.F., Zhou H., Liu C., et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines. *China Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2019; 38 (5): 956-972.
 14. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018; 246: 361-373. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2018.10.005>.
 15. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28 (5): 829-837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

канд. техн. наук, доцент, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШГА МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Ирина Юрьевна Гарифулина –

ст. преподаватель кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Наталья Евгеньевна Ломакина –

старший преподаватель кафедры горного дела, Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Павел Егорович Шаров –

студент направления подготовки «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет, Политехнический институт, 685030, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: sharov.pavel2005@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko –

Student of the Field of Training "State and Municipal Audit", Higher School of Economics, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Irina Yu. Garifulina –

Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Northeastern State University, Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Natalia E. Lomakina –

senior lecturer of the Mining Department, Northeastern State University Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Pavel E. Sharov –

Student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, 685030, Magadan, Russian Federation; e-mail: sharov.pavel2005@gmail.com

Критерии авторства:

В. В. Арно, И. Ю. Гарифулина – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы, оценка результатов и коррекция написанной работы; Н. Е. Ломакина, Е. П. Колесниченко, П. Е. Шаров – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.10.2025

Поступила после рецензирования: 19.11.2025

Принята к публикации: 22.11.2025

Contribution:

V. V. Arno, I. Yu. Garifulina – research idea, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, writing a scientific paper, evaluation of the results and correction of the written work; N. E. Lomakina, E. P. Kolesnichenko, P. E. Sharov – selection and collection of research materials.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 05.10.2025

Revised: 19.11.2025

Accepted: 22.11.2025